

太陽電池の技術開発と主力企業の戦略動向

R&D of Solar Cell and Business Strategy

田口 敏行

Toshiyuki TAGUCHI

(平成20年10月8日受理)

要旨

新しいエネルギーシステムとて、太陽光発電システムと太陽電池が注目されている。環境負荷を低減させ、次世代を担うエネルギー供給のシステムや製品開発は急務であり、太陽電池はその中核製品となる。世界的な規模で需要が高まっており、政策的にもまたビジネスチャンスとしても重視される対象である。わが国の太陽電池ビジネスは、2004年までは世界のトップを走っており技術的にも蓄積がある。ここ2、3年欧米企業やアジアを中心とする新興勢力の追い上げに直面し、シリコン系の太陽電池においてはやや劣勢にたっている。しかし、太陽電池の需要自体は世界的に広がり、ビジネスチャンスは拡大基調にある。

シリコン系の太陽電池において、やや劣勢にたっている日本の完成品メーカーであるが、将来性を踏まえた次世代製品の技術開発では積極的な取り組みを見せている。実用化技術ということでは、わが国企業の水準は高く、優位性と競争力をもつ。現状のシリコン市場での巻き返しや対策は必要とされるが、「省シリコン化」「脱シリコン化」を目指し、次世代技術やプロセス開発で優位に立とうとする戦略こそ、わが国の完成品メーカーにとっての必要不可欠な課題といえる。本稿では、そうした次世代の技術開発、製品開発に関わる動向と戦略特性を分析しようとした。開発しようとする太陽電池の種類と構造を踏まえたうえで、技術開発上のターゲットや課題を明らかにし、競争の焦点を解明しようとした。また、太陽電池の種類ごとに技術開発に取り組む優良企業の動向をまとめながら、戦略の動態をつかみ有効性を吟味していった。

1. はじめにー競争環境や技術開発の課題などー

世界的な原油高や原料高が進み、新しいエネルギーや素材の開発が急速に進められている。環境問題ではクリーンなエネルギーへの転換が国策として掲げられ、ビジネスとしても、新技術の開発や製品化が積極的に展開されている。世界的な規模で進む地球温暖化対策やCO₂削減の実現に向けて、国の政策課題としてもまたビジネスチャンスとしても需要が拡大している。

なかでも住宅部門において最大の眼目とされているのが太陽光発電である。かつてわが国の太陽光発電技術は世界一といわれ、実際にその導入量は世界一であった。2000年には太陽光発電の導入量は、米国が13万キロワット、ドイツが11万キロワットに対して、わが

国は33万キロワットにのぼり、2004年までは世界の発電量の50%近くを占めていた。資源に恵まれないわが国であるがゆえに、太陽光発電の技術開発とその導入に国の支援や補助が行われ、一般家庭への助成も実施されていた。そうした施策が世界一の地位につながっていたといえる。ただ最近では、2005年より住宅用太陽光発電への助成金が廃止されたことや、ドイツで太陽光発電の買い上げ制度（フィード・イン・タリフ（FIT））が強化され、ドイツメーカーによる生産拡大といった要因があり、トップの座を明け渡しているが、太陽光発電の需要は依然として増大している。

トップの座を明け渡したとはいえ、わが国においては、2008年の洞爺湖サミットで地球温暖化への対策が主要なテーマとなり、政府の政策として太陽光発電が再びクローズアップされている。2020年までに太陽光発電の導入量を10倍に引き上げ、2030年には40倍に引き上げることが目標とされている¹⁾。生産量を高めていくことはもちろんであるが、わが国の場合、生産の多くは海外に輸出されており、国内住宅への適用と普及率は非常に少ないという実態がある。住宅用の場合、一戸建てでは200万から250万円の費用がかかる。政府は、助成を復活させながらコストを下げる研究開発を政策的に進め、3年から5年の間に設置コストを半分に引き下げたいとしている²⁾。

そうした政策的な観点からの需要拡大もあり、太陽光発電に関わるビジネスは急成長している。太陽光発電の基盤は太陽電池であり、太陽電池に関わるビジネスが軸となる。製品としての太陽電池そのものはもちろんであるが、中核部品となるパネルを中心としたビジネス、川上の材料、部品、製造装置に関わるビジネス、そして川下の販売やアフターサービスに関わるビジネスといったように、幅広い領域に渡りビジネスが可能であり、さまざまな技術開発と差別化の競争が繰り広げられている。需要は国内に限らず世界的なものであり、欧米企業の追い上げがある。また、中国、インド、台湾などの新興勢力の参入もある。国内の関連企業も、競争優位に向けた技術開発や製品開発積極的に展開している市場環境にある。わが国の完成品メーカーとしては、シャープや京セラを中心に、三洋電機、三菱電機、カネカといった企業が太陽電池の生産量のシェアの高い企業である。

競争環境の特徴ということでは、わが国の太陽電池事業を担うメーカーは、専業ではなく総合電機メーカーである場合が多い。垂直的なつながりを活かしながら、これまで築いてきたノウハウや蓄積された資源を活用していくことは必要である。専業スタイルの新興勢力はどちらかというと、大規模投資、量産能力という戦略を一般的に強みとする可能性が高い。日本企業の競争優位に向けては、過去においては太陽電池の技術開発やビジネスを先導してきたことから、技術的な優位性をうまく発揮していく戦略は重要である。もちろん、その他にも考慮しなければならない戦略課題は数多くある。コストの低減をいかに図るかは非常に重要で、不足がちなシリコン材料を大量に調達する戦略、それを量産する戦略、など数多くある。概ね新興勢力の参入は、不足がちなシリコンを大量に調達するルートを確保し量産の能力を高めてシェアを取っていくやり方が多い。日本企業はシャープなどシリコン材料の確保に出遅れたこともあった。シリコン材料を使う製品が市場の9割近くを占めているなかで、新興勢力の戦略は強みを発揮しつつある。

しかし、そうしたシリコン材料を用いる現状の太陽電池に関わる競争戦略がある一方で、次世代の「省シリコン」「脱シリコン」にむけた開発競争と戦略も着々と進行している。特に次世代の技術面での最近の課題はというと、量産とコスト低減はもちろんであるが、

材料の変更に伴う新しいタイプの太陽電池開発が重要となっている。日本企業の主な戦略はそこに向けられてきているといえる。太陽電池は大別すると、シリコンを主な材料として用いるバルク系の太陽電池と、シリコンを少ししか使わないか全く使わないタイプの薄膜系の2つがある。バルク系は、単結晶シリコンと多結晶シリコンが中心であるが、ガリウム砒素を用いるもののあり、これらを「バルク系」太陽電池という。シリコンの使用量を少なくするあるいは使わないタイプの薄膜系は、アモルファスと多結晶の薄膜系、化合物系、有機系といった種類がある。現在の市場における主流はシリコン系の太陽電池であるが、2005年以降シリコン価格が上昇し、2007年には20%程度値上がりした。材料の大量調達、大量生産能力の構築などは重要な戦略であるが、「省シリコン」「脱シリコン」に向けた技術開発と次世代製品の開発戦略も一方で重要な内容である。

本稿では、そうした次世代の技術開発、製品開発にかかわる動向と戦略特性を分析しようとする。技術的には、コスト低減を実現する構造や材料の開発、高効率化の技術、安定性・耐久性の技術、集積化技術、死蔵プロセスの開発など、次世代の製品に関わる開発戦略が多くの企業で取り組まれている。薄膜系に関しては、シャープをはじめ次世代の開発戦略を実行に移しているし、ホンダや昭和シェルといった新規に参入した企業もある。化合物系を軸にする企業、有機系を軸にする企業もある。有機系の色素増感太陽電池は企業だけでなく研究機関や大学なども含め、日本では産官学三位一体となって進められている。

技術開発では特に次世代に関しては、日本企業の動きは積極的であり優位に立てる要因が多い。製品にもよるが、次世代の実用的な技術（特に要素技術）に関しては、日本企業が最も積極的であるとする報告もある。技術的な優位性は日本企業にとってどうしても必要な成功要因といえる。その理由の1つに、製造装置メーカーの装置供給による製造ノウハウの流出という問題がある。装置メーカーには、米国のアプライド・マテリアル社や日本のアルバック社などの大手企業がいるが、例えば、アプライド・マテリアルは、薄膜系太陽電池モジュールの製造ラインを一括して供給するビジネスをすでに展開している。装置が供給されれば、参入する環境が広がる。完成品メーカーとしてビジネス展開し易い。アプライド・マテリアルズ社はもともと半導体・液晶用製造装置の世界最大手であるが、07年に太陽電池の製造装置ビジネスに参入し、「サンファブ」という一環製造ラインの販売に乗り出した。1セット100億円である。その最新の生産ラインをいち早く導入し、新ラインを立ち上げて完成品メーカーとして参入してきた企業に、インドのモザーベアPV社がある。インドに本社を置く光ディスク製造の世界最大手モザーベアが、05年に設立した製造会社である³⁾。製造装置を手に入れば参入が可能となり「誰でもメーカーになれる」といった状況が一部で起こっている。中間財の市場化であり、それは新興勢力の量産戦略、シェア拡大、価格低下とコモディティー化、そして日本企業の競争力の低下、というデジタル家電市場で見られた状況の再現といえる⁴⁾。

そのような環境への対応の準備としても、また資源の蓄積のある日本企業の優位性に向けても、次世代の技術開発とその「内製化」を狙った戦略は必要不可欠である。本稿では、市場の成長性を跡付けながら日本企業に注目し、どのような技術開発と製品化により競争優位に立とうとしているのか、さまざまな取り組みを見せる企業と駆使する技術の優位性の根拠、そしてそれを軸に進める戦略動向をつかむことを主にしていく。

2. 太陽電池の市場規模と主力メーカーのシェア

最初に、わが国の太陽電池の生産量や市場規模、メーカー別の生産量など整理しておく。わが国の太陽電池生産量は長く世界一を保ってきたが、2007年にトップの座を欧州に譲り渡した。世界市場が急拡大する中、原材料の調達が遅れたことに加え、住宅用太陽発電への補助金廃止などにより日本市場は若干縮小した。企業別生産量で7年連続だったシャープも、同年にドイツメーカー（＝Qセルズ社）に抜かれる結果となる。しかし、太陽電池の生産量そのものは世界的に見て拡大している。日、米、欧でみると、日本は2001年に17万キロワットであったのが2006年まで増大し続け、同年には93万キロワットになり、2007年に92万キロワットと前年割れした。これに対して米国は、2001年に10万キロワットの生産量であったが、毎年増大させ2007年には27万キロワットの生産量に達している。そして欧州は、2001年には7万キロワットであったが、毎年増大させ続け2007年には日本を抜き106万キロワットと生産量トップの座を占めるに至った。太陽電池の総生産量は、世界的には増大し続けており、日本と欧州が主力生産国ということになる。

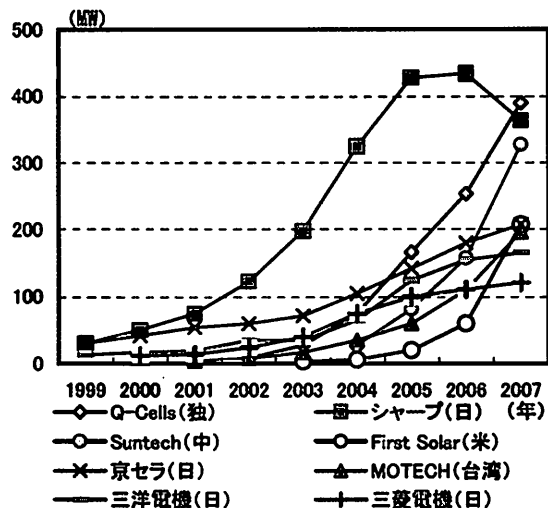
近年欧州で生産量が急拡大している理由は、ドイツをはじめ、太陽光発電からの電力を電力会社が優遇価格で買い取る制度（フィード・イン・タリフ〔FIT〕）を導入する動きがあるためである。特にドイツが積極的で、スペインやギリシャにも広がっており、欧州は太陽光発電の需要増に伴う太陽電池の生産量が急増している⁵⁾。日本にしても、生産量を若干落としたものの補助金の復活が計画されており、今後は再び増大していく可能性が高い。先にもふれたが、経済産業省は家庭向けの補助金制度を検討し後押しする体制を整えており、太陽光発電が大量に導入された場合の電力検討対策とその費用負担の検討も行っている。日本や欧米だけでなく、新興国の台頭もある。インドのモザーベアPV、中国のサンテック、台湾のモテックなど、生産量を急速に伸ばしている⁶⁾。世界的な生産量とマーケットは拡大基調にある。

国内に限定して生産量や主力メーカーの動きを見てみる。まず太陽電池の国内出荷推移では、年々増大させてきたが2006年に前年割れを起こした。2007年に生産量で欧州に抜かれる結果となったが、すでにその前年に国内の生産量はやや低下していた。これもすでに言及したが、補助金廃止の影響が強い。生産量の多くは輸出に回されていたが、その輸出も06年より低下傾向にある。また、国内メーカーの生産量であるが、2007年ベースで見るとシャープがトップであり世界のシェアの9.7%を占めている。ドイツのQセルズ社に抜かれたとはいえ、トップクラスのシェアを誇っている。その他国内の有力メーカーとして、京セラ（シェア5.5%）、三洋電機（シェア4.4%）、三菱電機（シェア3.2%）、カネカ（シェア1.1%）といった企業が上位を占めている。

2007年に限らず、時系列的に主力メーカーの生産量の推移を見たものが図表－1である。市場にいち早く参入し、シェアを拡大してきたのがシャープである。2000年以前から生産を開始しており、2006年まで世界の生産量のトップを走ってきている。2006年まではシャープの独壇場といっても良い。2000年以前からの参入はシャープ以外では京セラがいる。着実に生産量を伸ばしている。この2社が市場をリードしてきたと言える。その後、三洋電機や三菱電機の参入があり、着実に生産量を伸ばしてきているが、2000年以降多くの海外企業の参入が見られる。

2007年度ベースで、世界の全生産量に占めるメーカー別シェアをみると、欧州勢では07年にシェアトップになったQセルズ社をはじめ、Isofoton（西）、Schnett Solar（独）、Ersol（独）などがトップクラスの企業である。シェアはQセルズの10.4%を筆頭に、その他は1～3%台のシェアである。また米国勢では、FirstSolarがトップでシェア3.2%、次いでUnitedSolar（1.3%）、Solarworld（1.3%）といった企業が続いている。さらにアジア勢の新興企業としては、中国のサンテック（シェア8.8%）、台湾のモータック（シェア5.3%）、フィリピンのSunPower（シェア4.0%）などが代表的で、シェアはどれも高い。

図表－1 メーカー別生産量の推移（時系列）



（出所）「太陽電池をめぐる最近の動向－激しさを増す国際競争と開発が進む薄膜系－」『今月のトピックス』日本政策投資銀行2008年、No122、p1.

3. 太陽電池の構造や種類

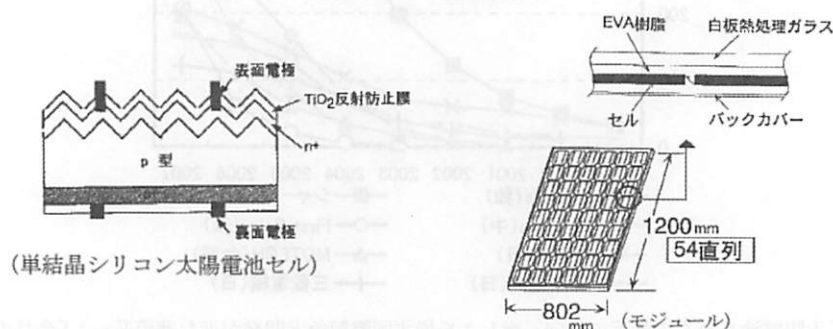
3-1. 太陽電池の構造

太陽電池に関わる市場は、材料をはじめ部品、製造装置などの川上から、電池のセル、モジュール、パネルそして電池そのもの、さらに販売やアフターサービスの川下までかなり幅広い。材料もシリコンを使ったものから、薄膜系のもの、そして薄膜系の中でも、「省シリコン」タイプのアモルファスと多結晶の太陽電池、「脱シリコン」タイプの化合物系や新素材系のものなど、多数ある。それぞれに材料選定上の戦略もあるし、構造を決める戦略、性能を高める戦略もさまざまなアプローチがある。電池をめぐる競争環境や戦略の意味をより具体的につかむには、太陽電池の一般的構造と種類を抑えておく必要がある。以下、一般的なレベルでまとめておく⁷⁾。

太陽電池は、光起電力効果を利用し光エネルギーを直接電力に変換する電力機器であり、「電池」といっても通常の一次電池や二次電池のような電力を蓄えておく機能はない。光の持つエネルギーを、直接的に電力に変換する。その変換過程では熱・蒸気・運動エネル

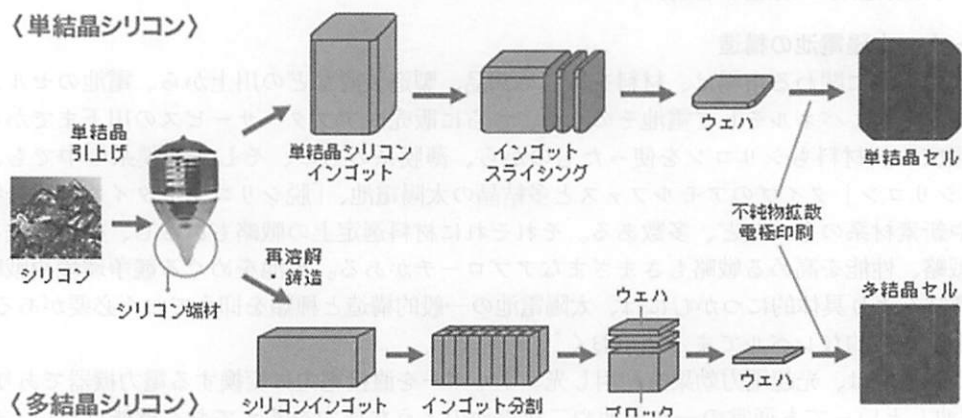
ギーなどへの変換を必要とせず、太陽電池内部に入射した光のエネルギーは、電子によって直接的に吸収され、予め設けられた電界に導かれて電力として太陽電池の外部へ出力される。主流のシリコン系の太陽電池の他、さまざまな化合物半導体などを素材にしたものが実用化されており、最近では有機系の色素増感型と呼ばれる太陽電池も研究されている。太陽電池（セル）を複数枚直並列接続して必要な電圧と電流を得られるようにしたパネル状の製品単体は、太陽電池パネル又は太陽電池モジュールと呼ばれ、モジュールをさらに複数直並列接続して必要となる電力が得られるように設置したものは太陽電池アレイとなる。代表的な構造図を図表－２に示す。現在一般的な太陽電池は、p型とn型の半導体を接合した構造を持つ。即ち、大きなpn接合型ダイオード（フォトダイオード）である。シリコン系ならびに化合物系の太陽電池がこれに該当する。発光ダイオードと逆の過程を通じて電子に光のエネルギーを吸収させ（光励起）、半導体の性質を利用して、エネルギーを持った電子を直接的に電力として取り出す仕組みを持つ。参考までにセルの作り方を図表－３に示す。

図表－２ 構造図



(出所) 富田孝司「太陽電池の製造技術と課題」『シャープ技法』第70号、1998年、p13.

図表－３ シリコン系の単結晶・多結晶太陽電池のセルの作り方



(出所) シャープHP (<http://www.sharp.co.jp/sunvista/structure/process.html>) より。

3-2. 太陽電池の種類

つぎに種類であるが、光吸収層の材料、および素子の形態などにより多くの種類に分類される。それぞれ異なる特徴を持ち、用途に応じて使い分けられている。技術開発においては、どんな材料を用いるか、どんな素子の形態にするかなど戦略的な分かれ道となる。また、材料や構造に変化が起こり、新しい技術や構造の製品が登場するとビジネスチャンスができ、逆に、あまり主流ではない材料や要素技術で事業展開を図ってしまうと競争からはずれ優位には立てない。戦略的に非常に大切な選択場面に関わる⁸⁾。

まず代表的なシリコン系の太陽電池であるが、シリコンを用いる太陽電池は、材料の性質の観点からは、大きく結晶シリコンとアモルファスシリコン(a-Si)に分類される。またその形態から、薄膜型や多接合型などに分別される。その形式や性能は非常に多様であり、近年は複数の型を複合させたものも実用化されている。太陽電池に用いられるシリコンの純度、格子欠陥は集積回路用に比べて基準がゆるく(いわゆるソーラーグレード)、これまでは集積回路用のシリコンが用いられてきたが、太陽電池の生産量が増加するに従い、ソーラーグレードのシリコン材料の供給が望まれてきた。シリコンの高純度化には従来、水素とシリコンを反応させて蒸留して純度を高める化学的な手法が使用されていたが、近年は冶金的な手法により、真空中で電子ビームを照射することによってシリコン中の不純物の気化精製、凝固精製を行い不純物を除去し、純度を高めるプロセスも開発されつつある⁹⁾。

3-2-1) シリコン系の構造による分類

シリコン膜の構造による分類からすると、単結晶シリコン型、多結晶シリコン型、微結晶シリコン型、アモルファスシリコン型となる。それぞれの特徴は以下のとおりである¹⁰⁾。単結晶型は、高純度シリコン単結晶ウェハを半導体基板として利用するもので、最も古くから使われている。変換効率は高いが高純度シリコンの利用量が多く、生産に必要なエネルギーやコストが高くなる。そのため近年は、多結晶シリコンや薄膜シリコン太陽電池に移行が進んでいる。技術開発戦略という観点からすると、単結晶型シリコンの太陽電池は主流から外れていくように思われる。

多結晶シリコン型は、結晶の粒径が数mm程度の多結晶シリコンを利用した太陽電池である。他のシリコン半導体素子の製造過程で生じた端材やオフグレード品のシリコン原料を利用して製造できるというメリットがある。単結晶シリコンに比べると面積あたりの出力(変換効率)は落ちるが、生産に必要なエネルギーは少なく、エネルギー収支やEPT、GEG排出量の面では単結晶シリコンより優れる。コストと性能のバランスの良さから、現在の主流となっている。近年はウェハを薄型化するコスト削減技術の競争が進んでおり、2004年の300 μ m厚から2010年には150 μ m厚に半減すると予想されている。また、ガラス上に非常に薄い多結晶シリコン太陽電池を形成する、CSG(またはSOG)技術の普及も有望視されている。

微結晶シリコン型は、微細な結晶で構成された薄膜をCVD法などにて製膜するもので、多結晶型の一つと見なせるが、製膜条件によってはアモルファス的な性質も併せ持つ。 μ c-Siなどと略記される。比較的新しい技術で、インゴットを切断する手間が省け、資源の使用量も削減できるほか、製法によっては200 $^{\circ}$ C程度の低温での製膜が可能で基板を選ばない、などの特長がある。今後、広範囲な応用が期待されている。

そしてアモルファスシリコン型であるが、シランガスから化学気相成長（CVD）させてできるアモルファスシリコンを利用した太陽電池で、形態的には薄膜シリコン太陽電池にも分類できる。結晶シリコンに比べてエネルギーギャップが大きいので、高温時も出力が落ちにくい特性を持つ。使用するシリコン原料が少なく、エネルギーやコスト的にも有利である。極端な低照度下での効率が高いことや、蛍光灯の短波長光に感度があることから、主に電卓など室内用途に使われてきた。太陽光で劣化しやすいのが欠点だったが、最近では長寿命化され屋外用にも市販されている。エネルギー変換効率が10%以下と低い（設置面積が大きくなる）のも欠点だったが、多結晶シリコン等と積層した多接合型とすることで高性能化されている。

3-2-2) シリコン系の形態からの分類

シリコン系をシリコン膜の形態から分類すると以下ようになる。薄膜シリコン型、ハイブリッド型（HIT型）、多接合型（タンデム型）、球状シリコン型、電界効果型の5種類となる¹⁰⁾。

薄膜シリコン型は、シリコン層の厚みを薄くすることで、使用原料、生産に要するエネルギー、コストなどの削減をはかったものである。比較的新しい技術で、様々な形態が存在するためひとくくりにするのは難しいが、広義には省資源化の意味で、従来の数百 μm よりも薄いもの全般（例えば100 μm 以下）を指す。狭義には柔軟性なども十分に得られる厚みの意味で、例えば10 μm 以下のものを指す。シリコン融液から表面張力でリボン状に引き出すストリングリボン法を用いた型や、CVD法などを用いる微結晶型などが代表的である。厚みは生産方法の選択によって100nm（0.1 μm ）単位から数百 μm 以上まで連続的にカバーでき、目的に応じて使い分けられる。インゴットから切断したウエハを用いて製造する場合は、通常数百 μm 単位になるのに対し、融液から直接薄膜の形にするリボン法などでは100 μm 以下、CVD法などを用いた場合（アモルファス型や微結晶型など）では0.5～数 μm まで薄くなる。薄膜のままでは充分に入射光を吸収できないため、表面テクスチャや中間層を用いて光学的特性を制御し、入射光の利用率を高める工夫が施される（ライトトラッピング）。効率の低下分よりも生産時の使用エネルギーやコストが多く削減できるため、環境負荷の観点から優秀なものが多い。なお、変換効率10%を達成したシャープが、1000MW/年の大量生産する新工場を、2009年度中に稼働させる計画を進めている。

ハイブリッド型（HIT型）は、結晶シリコンとアモルファスシリコンを積層した太陽電池である。通常の結晶シリコンに比して変換効率が高く、温度特性も良いなどの特長を有する。シリコンの使用量が減らせる他、両面受光型にも出来る。日本の三洋電機が主な製造者である。なお、吸収波長域の異なる材料同士を積層するという点では多接合型太陽電池に似るが、pn接合は1つ（単接合）である。

多接合型（タンデム型）は、吸収波長域の異なるシリコン層を積層したもので、アモルファスシリコンと各種の結晶シリコンを積層したものの他、通常のa-Siに吸収波長域の異なるa-SiCやa-SiGeを積層したものなどが開発・実用化されている。高効率で温度特性などに優れるものが多い。

球状シリコン型は、無数の球状シリコン粒子（直径1mm程度）と集光能力を上げる直径2～3mmの凹面鏡（電極を兼ねる）を組み合わせた太陽電池のことである。一般的な結晶

シリコン型の1/5程度のシリコン使用量で、アモルファスシリコンよりも高い変換効率が期待できる。2007年初めの時点で10%を超える発電効率が報告されている。球状シリコンの生産方法は、プラズマで溶かしたシリコン液滴を1～2秒程度自由落下で滴下させ、表面張力でシリコン液滴を球状とし、落下中にレーザー照射により結晶化させることにより生産される。個々のシリコン粒子は単結晶である。高純度シリコン原料の供給が追いつかない状況が続く中、シリコンの供給状況に影響されにくく、生産工程も簡易なことから、コストを下げやすい方式として普及が期待されている。2007年秋から日本企業にて量産開始、2008年より一般販売されている。

電界効果型は、従来のpin接合構造を持つアモルファスシリコン型のp型窓層の役割を、絶縁された透明電極から電界効果によって誘起される反転層に置き換えた構造を持つ。p型窓層内で再結合により失われていたキャリアを電界によって速やかに分離する効果等により、変換効率を飛躍的に改善するものと期待される。研究が行われていた1996年当時の従来型に比べ、最大50%の効率改善がシミュレーションより得られたが、製造プロセス等の課題により実験レベルでの大幅な効率改善には至っていない。

3-2-3) 化合物系の太陽電池（薄膜太陽電池）

シリコン系に対して、シリコンを使用しない化合物系の太陽電池がある。GaAs系、CIS系（カルコパイライト）系、Cu₂ZnSnS₄（CZTS）太陽電池、CdTe-CdS系の4種類が主である¹²⁾。

GaAs系は、単結晶のGaAsを用いるもので、禁制帯幅1.4eVで太陽光のスペクトルに良くマッチし、単接合セルでは最も高い変換効率を出せる。宇宙用など、特に高い変換効率が必要な用途に用いられている。

CIS系（カルコパイライト系）は、新型の薄膜多結晶太陽電池である。光吸収層の材料として、シリコンの代わりに、Cu、In、Ga、Al、Se、Sなどから成るカルコパイライト系と呼ばれるI-III-VI族化合物を用いる。製造法や材料のバリエーションが豊富で、低コスト品から高性能品まで対応できるのが特長である。また多結晶であるため大面積化や量産化に向き、フレキシブルなものやカスタマイズ品も作りやすい。シリコン太陽電池が苦手とする分野から実用化が始まっているほか、禁制帯幅が材料次第で自由に換えられることから、将来の多接合型太陽電池への応用も期待される。じせち製品としては有力であり、取り組み企業も多い。

Cu₂ZnSnS₄（CZTS）太陽電池は、近年開発が始まった材料系でCIS系に形態が似ているが、利用する材料がより豊富かつ安価であるのが特長である。日本の長岡工業高等専門学校などで研究が行われており、2006年の段階での変換効率は、最大で5.74%が確認されている。

CdTe-CdS系は、Cd化合物薄膜を用いた太陽電池であり、2枚のガラスに太陽電池を挟み込んだ形態のモジュールが代表的である。毒物であるカドミウムを用いるが、少量でしかも安定した化合物がモジュールに閉じこめられているため、実は環境負荷の低い太陽電池として知られている。日本では販売されていないが、性能が良くかつ安価であるため、米国や欧州において実用化が始まっている。

3-2-4) 有機系の太陽電池

最後に有機系の太陽電池についてだが、シリコンや化合物を用いた太陽電池に対し、光

吸収層（光電変換層）に有機化合物を用いた太陽電池のことである。製法が簡便で生産コストが低くでき、着色性や柔軟性などを持たせられるなどの特長を有する。変換効率や寿命に課題があるが、実用化されれば将来の市場で大きなインパクトが期待されるため、開発が競われている。色素増感太陽電池と有機薄膜太陽電池の2種類がある¹³⁾。

色素増感太陽電池は、有機色素を用いて光起電力を得る太陽電池である。代表的なものはグレッツェル型（または湿式太陽電池）と呼ばれる型式のもので、2枚の透明電極の間に微量のルテニウム錯体などの色素を吸着させた二酸化チタン層と電解質を挟み込んだ単純な構造を有している。製造が簡単で材料も安価なことから大幅な低コスト化が見込まれ、最終的には現在主流の多結晶シリコン太陽電池の1～数割程度のコストで製造できると言われている。また軽量、着色も可能といった特長を持つ。現在の課題は効率と寿命であり、技術的改良が進められている。電解液の蒸発を如何に防ぐかが重要であり、固体化などの技術開発が進められている。本格的なビジネスには至っていないが、次世代の担い手として企業のみならず、政府のプロジェクト、大学や研究機関の参入が激しい。

有機薄膜太陽電池は、導電性ポリマーやフラーレンなどを組み合わせた有機薄膜半導体を用いる太陽電池である。開発が進めば、色素増感太陽電池よりもさらに構造や製法が簡便になると言われており、電解液を用いないために柔軟性や寿命向上の上でも有利なのが特長である。21世紀に入ってから盛んに開発が行われるようになってきている。課題は変換効率であり、より高効率の出る材料の探索が進められている。

3-3 小活～ビジネスチャンスの対象やターゲット～

以上、太陽電池の種類を整理してきたが、小活として、種類別に市場環境や需要のトレンド、ビジネスチャンスの対象や技術競争のターゲットを鮮明にしていく。

市場環境からすると、単結晶シリコンと多結晶シリコンを中心する「バルクシリコン系」の太陽電池は市場の83%を占めており、アモルファスシリコン系を含めれば9割がシリコン系となる。省シリコンや脱シリコンを目指した化合物系や有機系の太陽電池は多くの優れた特徴を持ち合わせているものの、シェアはきわめて低い。近々で一気にシリコン系を代替するような対象ではなさそうである。

ただ、技術の開発トレンドは省シリコン化と脱シリコンへ進んでおり、薄膜系太陽電池に製品軸が固まってくる可能性がうかがえる。薄膜系では結晶系に比べてシリコン使用量は100分の1程度となる。素材の選定に戦略では重要な対象となる。薄膜系は使用シリコンが減る分、変換効率が低下する傾向があるため、変換効率をいかに高めるのかは大きな技術的課題である。そうした課題に対しては、アモルファスシリコン型の太陽電池を典型にして、太陽電池セルを2層（タンデム）にするあるいは3層（トリプル）にすることで変換効率を上げる取り組みなどが積極化している¹⁴⁾。シャープ、カネカなど行っている。ただし、タンデム化やトリプル化という構造作りは、多くの企業が行っており、差差別化つながるかどうかは難しそうである。

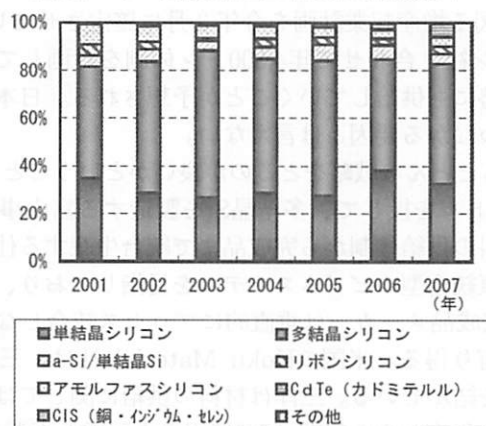
また、薄膜系はガラスまたは金属などの基板上で薄膜を形成できるため、製造工程がシンプルになり低コスト化が図れる。低コストの製造プロセス開発は量産を視野に入れると大切な技術開発課題である。この製造工程の開発ということでは、完成社メーカーだけでなく、製造装置メーカーにもビジネスチャンスが広がる。大日本スクリーンなど製造装置

関連事業に参入している¹⁵⁾低コスト化をもたらす装置の開発と提供が出来れば、装置メーカーにも大きなチャンスが広がる。しかし、日本企業からすると、装置に技術が一体化して移転していくことが一番脅威となる。製造装置の低コスト化と普及が進めば、製造技術が一気に移転することとなり、完成品ビジネスに一気に参入チャンスが広がる。特にアジア勢や新興勢力にとっては有利な要因であるが、日本企業にとっては技術的な参入障壁は高く持ち続けたいであろう。製造プロセスをブラックボックス化する必要がある。日本の完成品メーカーの戦略としては、装置を内製するか、装置メーカーと連携して「刷り合わせ」的な関係を作る必要がある。垂直統合型のビジネスモデルが基盤となる。

材料の選定、低コスト構造の開発、大面積化の技術、変換効率の向上、製造工程の開発などなど、技術開発の対象と課題は多い。自社の持ち合わせる技術はもちろん、次世代の製品化へのアプローチはさまざまであり、選択するアプローチで戦略の成否は大きく影響される。標準とされる技術や製法が確立されているわけではない故、焦点の置きどころは難しい。しかし、実用的な技術開発で先行する戦略自体はすでに取り組みが始まっているといつてよい。後述するが、政府も国家プロジェクト的な推進体制を引いている。先進太陽電池の研究開発、太陽電池に関わる未来技術研究開発などを実施し、産学官で次世代の技術開発が進められている。

ただ、現在の市場は単結晶と多結晶のシリコン系が主役であり、そこでの競争も激しい。図表－４は、種類別の生産量を時系列的に見たものであるが、ここからは種類別のシェアの推移を読み取ることができる。省シリコン化や脱シリコン化が有望であり、薄膜系の太陽電池は重要となっているが、実際の種類別に見たシェアの推移からすると単結晶型と多結晶型のシリコン系で80%以上を占め、ここ7年8年ほとんど変化がない。単結晶型はコスト高となるにも関わらず減少していない。多結晶型の方が結晶シリコン系としてはよりコストが低減されるが、だからといって生産量が増えているわけではない。少なくとも過去7～8年くらいはいわゆるバルクシリコン系である単結晶と多結晶型のシリコン太陽電池が市場のほとんどを占めている。

図表－４ 太陽電池の種類と変換効率



（出所）日本政策投資銀行、前掲、p3.

これまで見てきたように多様な種類の太陽電池が存在するにもかかわらず、また次世代に向けた動きも確かに起こっているにもかかわらず、単結晶と多結晶の結晶シリコン型太陽電池が完全に主流となっているのが現実である。企業の競争は、次世代に関わる領域だけでなく、現状のシリコン主流の状況下でも展開されている。現状を捨てて、将来のみに焦点をおく戦略はリスクであり、シャープや京セラなど「古参」のメーカーはシリコン系の製品でシェアを挽回しながら、なおかつ将来を見据えた戦略を実行に移していくことになる。

現状のシリコン系の市場における競争状況では、日本の完成品メーカーは優位性を落としている。ここは問題である。一時5割あったシェアは2割程度に落ち込み、かわってドイツのQセルズ社が台頭した。現状の主流となるシリコン系で劣勢にたってしまった。要因は、原料調達の遅れ量産能力の遅れであった。増産投資と原材料争奪に出遅れた国内完成品メーカーは、短期間でシェア低下を余儀なくされてしまったのである。こうした状況は、主流のシリコン系では、大量のシリコン調達力と量産能力が競争力の決め手となっている。2年前までトップシェアを誇っていたシャープはシリコン調達で失敗し、07年の生産量が前年実績を割り込む事態となった。7年連続で守り続けてきた世界シェア首位の座をQセルズに明け渡し、工場の稼働率低下で太陽電池事業が赤字に陥った¹⁶⁾。サンテック社などのアジアメーカーは、海外で上場し資金調達力をつけて参入し、設備と材料に大型投資していくやり方を得意とする。一気にシェアを高めていく。こうした戦略で日本企業は弱みがある。既存の主流となる市場において、量産能力とコスト力を発揮できるビジネスモデルを持ち合わさないと、常にシェアを奪われ劣勢に回る。今後、シリコン系の主流の製品市場への戦略の建て直しが求められる。特にシリコン調達の戦略が大切であろう。

シリコン確保が重要ということでは、シリコン増産をビジネスとする動きは活発化している。シリコン増産は、シリコン材料は通常完成品メーカーが手がけるのではなく、サプライヤーが存在する。既存企業ではトクヤマ、三菱マテリアルが代表的なサプライヤーである。トクヤマはトップメーカーである。国内の完成品メーカー向けに供給していくのか、海外勢にも広く供給していくのか定かでないが、シリコン不足が続く限りビジネスチャンスは広がる。三菱マテリアルは、四日市工場に335億円を投じて多結晶シリコン1,000トン／年の生産能力増強を図る増産起業計画を今年3月に確定させている。米国の100%出資子会社三菱ポリシリコン社と合わせて年4,300トン体制を計画している¹⁷⁾。ただし、材料供給メーカーは、海外勢にも供給していくことが予想される。日本の完成品メーカーからすると、一概に優位につながる要因とは言えない。

完成品メーカーとするとどんな戦略をとるのが良いかということになるが、シャープは、2006年1月に4,100万米ドルを投じて、多結晶Siを製造する富山事業所を開設している。完成品メーカーは、材料の供給体制から完成品まで統合生産する仕組みを確立する戦略をとろうとしている。垂直統合型のビジネスモデルを目指しており、優位に向けてのモデルといえる¹⁸⁾。しかし、完成品メーカーは垂直的にプロセス統合しなくても、材料意の供給は外部から仰ぐ戦略も有り得る。米国のHoku Materials社は、三洋電機と独Solar Fabrik社との間で大口契約を結んでいる。三洋は材料の供給に関しては外部のサプライヤーを利用する戦略である。今年度から3年間で700億円を太陽電池事業に投じ、生産能力を260メガワットから600メガワットに引き上げる計画である。材料を自前で調達するかサブラ

イヤーから供給を受けるかは重要な戦略課題である。

材料サプライヤーとしての参入は多いため、供給環境は広がっていく。JFEスチール、NSソーラーシステム（新日鉄マテリアルの子会社）、日本ソーラーシリコン（チッソ、新日鉱HD、東邦チタニウムによる共同会社）など、参入している。ただし、参入するサプライヤーといえども、シリコン自体の量産化をもたらす新技術（冶金法、CSS技術）を確立する必要がある。完成品メーカーに供給するに先立ち、材料となるシリコンの量産技術を持っていないと完成品メーカーとのつながりにつけられない。サプライヤーとしての量産能力を持ち合わせていないとならない。

また、材料の品質自体も一定程度の評価を得なくてはならない。シリコンの量産技術ということでは、「多結晶シリコン」「金属シリコン」「シリコンウエハー」は、同じシリコンといっても加工段階が異なる。金属シリコンは自然界に大量に存在する珪石（ SiO_2 ）をアーク炉などで還元して作られるSiで、純度は95%から99%と低い。この金属をガス化して析出することで、純度の高い多結晶シリコンが得られる¹⁹⁾。昔は、太陽電池向けのシリコンは半導体向けのシリコンに比べて品質は低いものでも良かった。半導体向けは純度を99.99999999%まで上げなくてはならないのに対し、太陽電池向けは4桁純度が低い99.9999%でよい。しかし近年はそうした使い回しではなく、シリコンメーカーは最初から太陽電池向けの純度で作る体制を整えなければならなくなっている²⁰⁾。サプライヤーとしての戦略が求められる。

完成品メーカーとしては、調達量とともに材料の質の吟味や選択、さらには材料の「半製品」の程度も戦略課題となる。サプライヤーから、どの程度まで仕上がった半製品を調達するのか、質をどこまで吟味するのかなど選択ができる。シリコン材料の調達といっても、近年勢力を伸ばしているQセルズはノルウェーの会社から加工度の低い金属シリコンを調達し、それを外部の会社に委託して多結晶シリコンからインゴット、ウエハの段階まで加工するのに対して、サンテックなどはウエハの状態ですべて買ってくるのである²¹⁾。完成品メーカーからする材料調達戦略といっても、どこまで自前でやるのかしっかり戦略を立てておかないと、強みに直結しない。インゴット状態で購入し残りは自前で行うのか、ウエハ段階のものを買って以降自前でやるのか、完成品メーカーの調達材料の選択は優位性に関連してくる要素となる。

いづれにしても、国内完成品メーカーは劣勢を放置しておくことは出来ない。製造プロセスや原料調達を含めて量産能力と規模の拡大を図り、新興勢力に対抗していく必要がある。紙面の都合上、現状市場に限定した完成品メーカーの戦略を詳しく述べることは出来ないが、材料調達をしくとした量産戦略が軸となることは確かである。

以下、本稿では、次世代を見据えての技術開発と主要企業の戦略動向に絞って、戦略動向を考察していく。

4. 次世代製品に関わる先進技術開発と主力企業の戦略動向

4-1. 「省シリコン」と「脱シリコン」に向けての取り組み

～次世代薄膜太陽電池（アモルファス系、化合物系、有機系）～

1) 主な技術開発課題

まず、国内の完成品メーカーを対象に、次世代の太陽電池全般にわたる技術開発と取り組み状況を確認しておく。技術開発課題からみる。次世代製品の特徴は、「省シリコン」ならびに「脱シリコン」に向けての取り組みが中心となる。市場はシリコン系の単結晶・多結晶が軸ではあるが、新興勢力や欧米企業の追い上げがあり、日本企業としては、次世代の技術開発が優位につながる戦略課題と見ているように思われる。より具体的な次世代製品は、薄膜系の太陽電池であり、省シリコン化と脱シリコン化が大きな課題といえる。

省シリコン化ということでは、アモルファス太陽電池が有望である。シリコンの使用量は多結晶・単結晶系の太陽電池に比べ100分の1程度に抑えられ、材料の選定としての効果大きい。ただし、低コスト化、変換効率の向上、大面積モジュール化といった課題がある。特に変換効率の向上は最重要課題であり、セルを2層、3層にするタンデム型、トリプル型のアモルファス太陽電池の開発と製品化が注目される。シャープやカネカなど、わが国のトップメーカーであるが、省シリコン化ということではタンデム型、トリプル型のアモルファス太陽電池の開発を展開している。ただ、低コスト化という点では、基盤の選定が重要となる。通常、基板にはガラス材料（遮光性材料）が使われる。シャープやカネカもガラスを基板にしている。しかし、コスト、軽さ、フレキシブル性などの点で優位性が発揮できない。そこで、プラスチックフィルムやステンレスなどの非遮光性材料を用いることで低コスト化、軽量化、フレキシブル性を発揮しようとする取り組みがある。富士電機システムズや三洋電機では、非遮光性材料を用いる対面電池の開発が進められている。三洋電機では製造工程において、kmオーダーの長尺基板を一括処理して連続生産できるプロセス技術（ロールツーロール方式）を開発している。高効率性はもちろんであるが、低コスト化や製造プロセスの開発も重要な技術課題となる。

脱シリコン化ということでは、化合物系と有機系の太陽電池に分かれる。全くシリコンを使わない太陽電池であり、どちらも薄膜太陽電池に区分される。化合物系の太陽電池は、銅（Cu）、インジウム（In）、ガリウム（Ga）、セレン（Se）を原料とする（CIS系あるいはCIGS系）のものと、カドミウムテルル（CdTe）を原料とするものの2種類がある。技術的な課題としては、薄膜高品質化における高効率化、高品質製造プロセスの高速化などである。薄膜高品質化における高効率化では、光吸収層の高品質化や接合界面の改善などが具体的な課題となる。先進事例としては、セレン化／硫化法を用いる取り組みが昭和シェルにより行われており、30×120cmサイズ1枚のもののCIS系薄膜太陽電池の安定製造条件を確立し、3,600cm²サイズの基板上に作製したサブモジュールで変換効率13.6%（世界最高）を達成している²²⁾。薄膜製造高速化においては、多元蒸着法によるロールツーロールプロセス、高速スクライプ法、絶縁層高耐圧化などが課題である。

有機系では、色素増感太陽電池の研究開発と取り組みが注目される。こちらは、企業だけでなく研究機関や大学などでも進められている。この太陽電池が注目された経緯は、1991年にスイス・ローザンヌ工科大学（EPFL）のGraetzel博士らによる研究成果であり、

97年には変換効率10%を達成している。この値は米国のNREL（National Renewable Energy Laboratory）によっても確認され、その後多くの研究者によって研究開発されている²³⁾。色素増感太陽電池の特性としては、真空装置を必要としない簡易な方法により安価に製造できる可能性が高く、また変換効率の向上も期待されている。シリコン系と比較して、①広い入射角度の範囲で高い変換効率を得られる、②30℃以上の高い温度条件での使用でむしろ変換効率が向上する、③低光量でも効率的な変換効率が期待できる、などのメリットがある。また、フィルム化による量産プロセスを確立することで、低出力であっても軽量性、フレキシブル性、携帯性、カラフル性などの特性を生かした用途が期待できる²⁴⁾。

色素増感の技術的な課題ということであるが、この電池は基盤、導電膜、半導体膜（光電極）、色素、電荷輸送材（電解質、溶媒）、対極などから構成されており、各構成要素の改良や封止技術、低温成膜技術、量産化技術などが課題として重視されている。長寿命化、光電変換効率、大面積化、低コスト化が必要である。課題は多いといえるが、簡単な素子構造で基板のフィルム化も可能となり、高く軽量かつフレキシブル、低コストなど多くのメリットを持つ。住宅用だけでなく、家電用、携帯電源用など小型電子機器への展開も期待できる。起業はもちろんであるが、研究機関、大学での研究も着々と進められている。大手企業としては、シャープ、関西ペイント、日本マクセル、日本触媒、東芝、アイシン精機、フジクラ、三井物産などが手がけており、研究機関や大学では、産総研、東京大学、大阪大学、京都大学、岐阜大学など、多数である。

日本企業の競争力のということでは、特許庁による特許出願動向や調査からの見解であるが、色素増感太陽電池の研究開発活動は日本が一番活発であるとされる。ただし、商品化の面から見ると、本格的なビジネスにはなっておらず、基本的には開発段階である。しかし、各要素技術の実用化という点では日本企業が積極的であり、高い競争力を持ち優位に立っている。特許庁の調査報告書では、「変換効率向上、耐久性の改善、コストの低減、フレキシブルフィルム化などの課題に対し、基板、導電膜、光電極、色素、電解質、対極などの素材・原料・加工技術などについて幅広く取り組みが行われ、各々の分野において高いレベルの実用化技術が構築されつつある。基本技術はEPFLにより開発されたが、実用化技術においては明らかに日本の技術が世界をリードしていると思われる」と評価している²⁵⁾。

2) 完成品メーカーの戦略動向

次世代太陽電池3種類別に、それぞれ完成品メーカーの取り組み状況や戦略動向を考察していく。全体像を簡単に触れた上で、注目される企業を取り上げ個別に考察する。今回個別に取り上げる企業は、省シリコン化に関わるアモルファス系太陽電池では富士電機システムズ社を、脱シリコン化に関わる化合物系太陽電池では昭和シェルとホンダを取り上げる。そして最後に、脱シリコン化に関わり有機系の太陽電池（色素増感太陽電池）で、アイシン精機、フジクラ、ベクセル社などを取り上げる。まずは、省シリコン化に関わるアモルファス系の太陽電池から始める。

国内の完成品メーカーの主力は、シャープ、京セラ、三洋電機、三菱電機、カネカといった企業が挙げられる。図表-5は、最近の各メーカーの取り組み状況をまとめたものである。省シリコンを代表するアモルファス系の太陽電池への取り組みは、シャープ、カ

ネカ、三菱重工、富士電機システムズなどが行っている²⁶⁾。前の3社は、変換効率向上に向けてのセルの層のタンデム化、トリプル化を中心としているように思われ、軽量化や低コスト化を踏まえての差別化はあまり見られない。基板材料も3社ともガラス基板である。その点、富士電機システムズは、基板をフィルム化してのアモルファス太陽電池に取り組んでおり、差別化を図っている。

図表－5 薄膜系の太陽電池への取り組み

主材料	会社名	種類	基板	備考	主材料	会社名	種類	基板	備考
シリコン系	カネカ	a-Si	ガラス	・タンデム型(2層):アモルファスSiと薄膜多結晶Siを積層 ・2層構造に透明な中間層の積層が効率向上に寄与	化合物系	昭和シェル	CIS	ガラス	・Se(セレン)の一部をS(硫黄)で置換
	三菱重工	a-Si	ガラス	・タンデム型 ・トリプル型(3層)も開発中		ホンダ	CIGS	ガラス	・自動車メーカーとして初めて太陽電池事業参入
	シャープ	a-Si	ガラス	・タンデム型:アモルファスSiと微結晶Siの2層 ・トリプル型:アモルファスSi(2層)と微結晶Si(1層)の3層		Nanocolor(米)	CIGS	金属フィルム	・プラント ・ロール・ツー・ロール製法 ・フレキシブル
	富士電機システムズ	a-Si	プラスチックフィルム	・2層:アモルファスとa-SiGe(アモルファスSiゲルマニウム) ・ロール・ツー・ロール製法 ・フレキシブル		Global Solar(米)	CIS	ステンレス	・商業ラインで10%の変換効率を記録 ・蒸発・気化技術
	Q-Cells(独)	a-Si	ガラス	・薄膜太陽電池(タンデム)を開発中		First Solar(米)	CdTe	ガラス	・製造コストが薄膜Si型より25～30%安い ・ガラス基板を投入後約2.5時間でモジュール完成 ・Cdを使用するため、使用後済製品を引き取る
	United Solar(米)	a-Si	金属フィルム	・3層 ・ロール・ツー・ロール製法 ・フレキシブル		Astec Solar(独)	CdTe	ガラス	・CdTeモジュール製造販売を実施 ・ベンチャー企業、株式上場を予定

(出所) 日本政策投資銀行、前掲、p 4。

①富士電機システムズ(省シリコン化：次世代アモルファス系の太陽電池)

2005年9月熊本県玉名郡南関町に新工場を完成させ、フィルム型のアモルファス太陽電池“F WAVE”の生産を開始した。ガラスを使わず軽くて曲がり、薄いことを特徴とした太陽電池である²⁷⁾。ガラス基板(＝遮光性基板)は化学的な安定性、耐湿性、耐電圧特性など優れた材料であるが、軽量性やフレキシブル性に弱く、また低コスト化を図る上では弱点がある。富士電機の電池は非ガラス化(＝非遮光異性)によりコストを下げ優位性につながる技術開発の例といえる。

戦略的には製品の性能向上は非常に重要でありその点、変換効率の向上が目指される。アモルファスの場合、特にシリコン系と比べて変換効率落ちる。シャープやカネカのように高効率化を目指すのが王道といえる。しかし技術開発のアプローチを低コスト化に置くと、基板の材料選定という視点が非常に重要となる。富士電機の場合、その視点が他社と異なっている。

同社の開発プロジェクトは、平成5年から12年までのNEDO委託研究を元に発展させたもので、「フレキシブルなプラスチックフィルムを基板とし、kmオーダーの長尺基板を連続して一括処理することが可能なロール・ツー・ロール方式によるフィルム基板型アモルファスシリコン系太陽電池の量産プロセス」が重要となる²⁸⁾。セル構造はタンデム型で、トップセルにアモルファスシリコンをボトムセルにアモルファスシリコンゲルマニウムを用いてのフィルム状の太陽電池である。製造プロセスは、ロールに巻かれた幅50cm、長さ1kmのプラスチックフィルム基板を7室の成膜質を通すことで順次膜を形成、積層し、面積

40cm×80cmアモルファスシリコン系太陽電池を連続的に製造する。4分間で1枚の速さで連続生産できるプロセス技術が確立されている。変換効率8.2%を達成し、通常の薄膜系太陽電池と比べて遜色のない性能であった。フィルム材料には耐久性にすぐれたフッ素系フィルムが用いられており、20年以上の耐久性が確認されている²⁹⁾。

フィルム化したことにより軽量化が図られ、さらにロールツーロール方式による量産化技術も確立しており、優位性につながる開発事例といえる。「軽い、薄い、曲がる」という特長により、これまで太陽電池が使用されていなかった分野への使用が可能となる。現在主流となっている太陽電池は、ほとんどが屋根向けとして使用されているが、フィルム型のアモルファス太陽電池では、電車や電気自動車などの移動体に搭載したり、携帯電話やノートパソコンなどモバイル機器の充電器として使うことも可能となり、これまで太陽電池が搭載されていなかった新たな分野への用途拡大が見込める。富士電機グループでは、建築・建材関係はもとより、電子機器や輸送機器、生活用品、物流、流通、外食など、さまざまな産業分野の企業をパートナーにこの太陽電池の用途開発・普及に力を注いでいる。

②三洋電機（省シリコン化：アモルファス／薄膜結晶シリコン積層型太陽電池）

非ガラス化に向けた開発事例として、三洋電機によるアモルファスシリコン／薄膜結晶シリコン（＝a-Si／薄膜結晶Si）積層型太陽電池がある。この事例は、光劣化という問題の解決と非ガラス化を合わせて解決しようとした事例である。

a-Si太陽電池は、高い出力電圧が得られる半面で、使用中における変換効率の変化（光劣化）という問題がある。そこで光劣化のない薄膜結晶Siを発電層に用いることでその問題点を解決しようとしている。光劣化のない薄膜結晶Siと高い出力電圧を有するa-Siの両方の利点を合わせ持つ「a-Si／薄膜結晶Siの積層型太陽電池」による高効率化が目指されている³⁰⁾。さらに、ガラス基板（＝遮光性基板）ではなく軽量でフレキシブルな形状のステンレス薄板やプラスチック基板（＝非遮光性基板）上で集積化を行うという研究開発も行っている。軽量でフレキシブルな形状のステンレス薄板やプラスチック基板上で集積化を行えることができれば、製品の付加価値が高まるとともに、単一基板から高電圧の出力を得ることが可能となる。このことは、太陽電池の直流出力を一般電力用に交流変換する上での効率（インバーター効率）の点で有利となる。また、高電圧を得るための電気配線を簡略化でき、家屋の屋根への設置自由度が広がり屋根全面を余すところなく利用できる。

非遮光性基板を用いての集積化向上の具体的取り組みであるが、これまでの集積化技術では、太陽電池を形成した基板の裏面側からレーザー光を入射して加工対象の層を除去するレーザーパターンニング技術が確立されていたが、非遮光基板を用いた場合、レーザーパターンニングが難しくなる。つまり、非遮光性基板を用いると、基板の光透過性を利用した裏面側からのレーザー加工が不可能となり、太陽電池を形成したデバイス面からの加工に限定されてしまう。最終的には、集積化に対して熱的ダメージを与えることなくTCO（遮光性導電酸化膜）をレーザーパターンニングすることが課題となる。三洋電機では、短波長・短パルスレーザー光源であるエキシマレーザーを用いてTCOの低ダメージパターンニングの検討が行なわれ、レーザーパターンニングのエネルギー密度を変えることで、熱的ダメージのないa-Si上でのTCOのレーザーパターンニングを実現した。真性効率（有効受光面積あたりの変換効率）として10.12%が得られ、非遮光性基板を用いたa-Si／薄膜結晶Si積層型太陽電池の集積化が可能であることを実際のセルで実証している³¹⁾。

③昭和シェル石油（脱シリコン化：次世代CIS系薄膜太陽電池）

一方、脱シリコンということからすると、日本の完成品メーカーでは異業種からの参入組が多い。昭和シェルとホンダである。昭和シェルは、脱シリコンに向けた化合物系（CIS）の太陽電池に取り組んでいる。2007年よりシリコンを全く使わないCIS太陽電池の商業生産を開始しはじめた。最近では昭和シェルソーラー株式会社との共同で、CIS太陽電池技術開発強化を目的としたリサーチセンターを設立し、製造装置のアルバック社と量産技術に関する共同開発を開始することを決定している。

同社の研究開発は、NEDOが進める「先進太陽電池技術研究開発」ならびにその後の「太陽光発電システム未技術研究開発」のなかでの取り組みが強い。NEDOのプロジェクトにおいての同社の目標は、性能で3,600cm²サイズ以上のプロトタイプモジュールにおいて変換効率13%以上、そしてコスト面では100MN/年程度の量産規模において製造原価100円/W以下で、開発アプローチとしては、①各構成薄膜層の大面积化、②高耐久性パッケージング構造の開発、③各構成薄膜層の製膜安定性による低コスト、が軸となっている³²⁾。技術開発という点では、大面积への対応（ベースラインプロセスの決定）に関わるところで発揮されており、反応ガス循環タイプの反応炉の開発（光吸収層製膜でのセレン化法）、金属裏面電極製膜（DCマグネトロンスパッタ法）、インライン式MOCVD装置の開発（TCO窓層作成でのMOCVD法）、同一溶液の繰り返し使用、廃液処理法の開発（バッファ層製膜での溶液成長法）、各種のパターンニングなど、特許出願がなされている。2006年からのNEDOによる太陽光発電未来技術研究開発」プロジェクトにおいても、CI系薄膜太陽電池で委託先企業となっているが、そこでは、セレン化・硫化法を用いた太陽電池モジュール作製法において、製膜プロセスの最適化、Naドーピング制御技術開発、バッファ層製膜法開発、高移動度透明導電膜の開発などを行うことで、サブモジュールにおける（30cm×30cm）高効率化を行っている。ガラス基板への取り組みは行われておらず、基板は青板ガラス（30cm×120cm）サイズが用いられている。

④ホンダ（脱シリコン：CI(G)S系次世代薄膜太陽電池）

脱シリコンに向けて化合物系太陽電池開発に際して、異色な事例にホンダの参入を上げることができる。2002年に次世代型の薄膜太陽電池の量産技術を開発し、参入を果たしている。ホンダの生産技術開発を担当する子会社ホンダエンジニアリング（=EG）が中心となっている。銅-インジウム-ガリウム-セレン（CIGS）による化合物薄膜太陽電池と量産化技術を開発している。特に量産化技術の開発には力が入れられており、そこに参入の狙いと優位性の発揮を狙う戦略がある。量産化は二輪車や四輪車、エンジンやハイブリッドモーターなどの製造設備や生産技術などを開発するEGが独自に開発した薄膜太陽電池量産プロセスによるが、太陽電池ビジネスはホンダが全額出資した太陽電池子会社＝ホンダソルテック（熊本県大津町）が行っていく。

ホンダが九州で太陽電池の生産に参入する理由の1つは、九州地域に半導体の技術や人材が豊富にあったことによる。太陽電池は、生産には半導体の製造装置や原料などが応用されることが多く、これまではシャープや三菱電機など電機大手が強かった。しかし、九州での半導体産業の急成長が一段落したのに伴い、異業種でも関連人材を確保しやすくなった。ホンダソルテックは、07年10月までに採用を見込んだ約25人の正社員の約7割が半導体関連メーカーでの勤務経験者を対象としていた。これまで言及してきた富士電機や昭和

シェルも吸収に拠点を置いている。九州は「シリコンアイランド」であり、そこで培われた人材が事業に生きることになった³³⁾。もう1つの理由は、地元で製造装置や部品を入手しやすいことも九州のメリットであった。一般的かつ汎用的な製造装置を非常に入手しやすい。ホンダの場合、人材に加え、製創装置の調達のしやすさが新規参入のチャンスを大きく広げたといえる。

ただし、そうした参入のしやすさという環境要因のみがホンダのきっかけとなっているわけではない。実はホンダは基礎研究から数えて10年近い歳月を太陽電池に費やしている³⁴⁾。セレン化法自体は目新しくないが、車の塗装技術を応用したナトリウム添加方法、InS系のバッファ層などの独自技術をもち、先行した昭和シェルにほとんど引けをとらない性能を得ているとの評価もある。モジュールでは、発電素子の構造から一部分が影に覆われても大きな電圧低下を起こすことなく安定した発電性能を発揮し、そこには独自の高電圧モジュールにより実現できた「全並列接続方式」がある³⁵⁾。特に次世代の取り組みに際しては、独自技術の蓄積に優位性につながる要因があるといえるかもしれない。

⑤色素増感太陽電池－アイシン精機、フジクラ、ベクセルなど－

完成品メーカーの動向として最後に、色素増感太陽電池に関わるメーカーの動向を考察していく。要素技術を中心に多くの企業が研究開発に取り組んでいる。複数の企業になるが有力と思われる企業を取り上げていく。

アイシン精機は豊田中央研究所とともにガラス基板型の大型パネルを開発している。10cm角のセルを64個直列接続したモジュールで、約180日の屋外実証実験を行い同じ発電出力で規格化された単結晶シリコン系太陽電池よりも総発電量が10～20%優れていること、北向きの屋根では焼く40%多いことが報告されている。同時に24cm角のガラス基板に約30個の単セルを直列接続した集積化モジュールも公開している。2004年7月の愛知万博にあわせて1面がモジュール12個で構成される壁パネルを4パネル分20㎡作成し、「トヨタ夢の住宅PAPI」にサンプル出荷している。このパネルは、焼く1.5年を経過した時点でも安定した出力を維持している³⁶⁾。

またフジクラは、自社開発した透明導電性電極／集電機能、電解液の凝固体化などの技術をベースに2006年1月、410mm×140mmの単セルを14枚組み合わせた1,190mm×840mmの大型パネルモジュールを発表している。同社は、各電極要素の形成にはスクリーン印刷を用い、より実用に近い製造方法を確立している。モジュールの展示は室内展示であったが、数ヶ月単位の負荷連続運転がされた。セルモジュールの大型化技術の開発例であり、窓側電極－対極間を封止してから電解液を注入するのではなく、両電極間に電解質を挟み込んだ後に外装ケースに注入する形式をとり、このため室温で流動性のないナノコンポジットイオンゲルをあらかじめ印刷塗布することができる³⁷⁾。そうしたセルとモジュールの大型技術に加え、スクリーン印刷法による製造方技術も開発している。導電性基板上に集電配線やTiO₂多孔質電極を一貫して形成する実用技術に近い方法であり、「デバイス化技術を改良し高効率化をはかるとともに、より多様な形状のセル、モジュールを開発して、実際の製品イメージに近い形態を製造技術とともに提案し続けてゆく」としている³⁸⁾。

さらに桐蔭横浜大学の宮坂氏らが設立したベンチャー企業「ベクセル」は、30cm角のプラスチック基板太陽電池の製造を行い、耐久性試験に入るなど、プラスチック型太陽電池の開発を加速しており、同時に部材販売ビジネスも展開している。電池の基板には導電性

をもつプラスチックフィルム基板にPEN＝ポリエチレンナフタレートと呼ばれる素材を使用し、色素には貴金属などに使用されるルテニウム、酸化チタン、電解液などを使用している。プラスチック基板を用いることで色素増感においても曲がる、軽いといった低コストの太陽電池を開発しているところに特徴がある。また、色素増感太陽電池を製造する装置も販売している。装置に関しては、色素増感太陽電池では大掛かりな装置は必要とされないという特徴があったが、ベンチャー企業であっても装置自体を内製し販売もできる簡便さを押し量ることが出来る。装置には、作用スペクトル（IPCE）測定装置やPEC-S10ソーラシミュレータ（PEC-L11コンパクト）などがある³⁹⁾。

とりわけ軽量化と低コスト化を実現した技術開発がベンチャー企業としての成功要因であったと設立者の宮坂氏は振り返っている。薄くて軽いことから、携帯電話などへの適用が考えられるが、被服メーカーやコンビニエンスストア業界からも相談があり、予想外の産業への適用もこれから出てくると宮坂氏は予想している。色素増感太陽電池のビジネスも、住宅用に限らず幅広い用途を視野に入れると、かなりのビジネスチャンスがあるといえる。

4-2. NEDOによる太陽電池技術開発プロジェクト

4-2-1) 先進太陽電池技術研究開発（2001～2005年）

本稿を締めくくるにあたり、最後に政府の太陽電池に関わるプロジェクト（NEDOのプロジェクト）を簡単に整理しておく。次世代の太陽電池に関しては、政府もその推進に力を入れており、産学官といったようになっての取り組みも見られる。最近では、2001年に「革新的次世代太陽光発電システムの開発」（2001年から2005年）を設定し、「従来の概念にとらわれない新しい材料・構造・製造方法等により大幅な低コスト化が実用可能と考えられる新しい発想の太陽光発電システムに関する実用化研究、要素研究、シーズ研究」と位置づけられ、『先進太陽電池技術研究開発』として成果集がまとめられている。そして2005年からは、「太陽光発電技術研究開発 革新的次世代太陽光発電システム技術研究開発 色素増感太陽電池の新技術先導調査研究」が約半年間行われた後、2006年からは、4年間で100億円を投じて「太陽光発電システム未来技術研究開発」が進められている。『先進的太陽電池技術研究開発』と『太陽光発電システム未来技術研究開発』について、それぞれのプロジェクトの概要と研究委託された企業や研究機関、大学の取り組みを中心に動向をまとめておく⁴⁰⁾。先進的太陽電池プロジェクトからみていく。

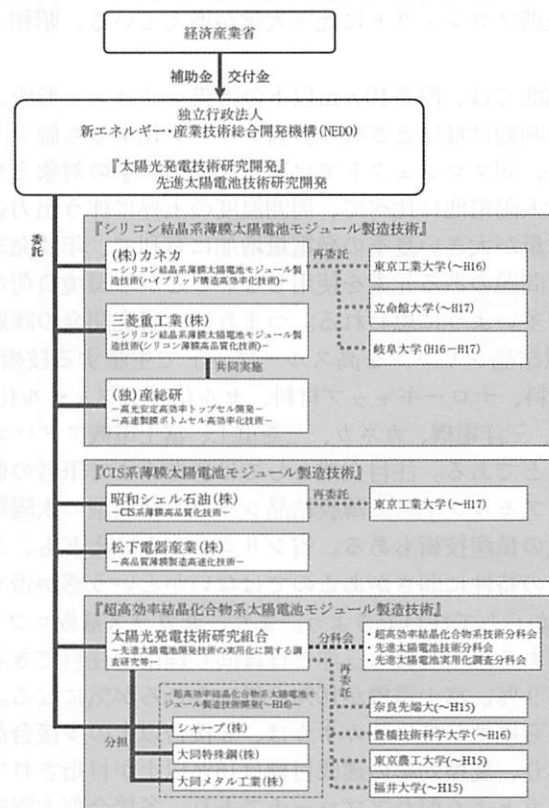
このプロジェクトでは、狙いが「2010年度導入目標4820MWの達成に向けて、太陽光発電コストを家庭用電力料金並みにまで低減することを目的とし、製造原価が100円/Wを実現できる太陽電池モジュールを開発すること」におかれ、開発項目としては「高効率化」「セルの高品質化」「低コスト化」「製造コストの低減」などを重点とし、①シリコン系結晶薄膜太陽電池モジュール製造技術、②CIS系薄膜太陽電池モジュール製造技術、③超高効率結晶化合物系太陽電池モジュール製造技術、という3つのカテゴリー別に委託研究という形で企業や大学に研究委託し成果を出そうとするプロジェクトであった。

シリコン結晶系薄膜太陽電池モジュール製造技術分野では、(株)カネカ、三菱重工業(株)、産総研が委託先となっている。カネカは、ハイブリッド構造高効率化技術を手がけ、必要に応じて東京工業大学、立命館大学、岐阜大学に再委託を行っている。三菱重工と産総

研は共同実施という形をとり、三菱重工はシリコン薄膜高品質化技術を手がけ、産総研は高速薄膜ボトムセル高効率化技術を手がけている。また、CIS系の薄膜太陽電池モジュール製造技術では、昭和シェル石油、松下電器が委託先となった。昭和シェルはCIS系薄膜高品質化技術を手がけており、必要に応じて東京工業大学に再委託を行っている。松下電器は高品質薄膜製造高速化技術を手がけている。そして超高効率結晶化合物系太陽電池モジュール製造技術では、太陽光発電技術研究組合を組織化し、シャープ、大同特殊鋼、大同メタルの3社が分担し合う形をとった。奈良先端大、豊橋技術科学大学、東京農工大、福井大学に必要に応じて再委託がされている⁴¹⁾。実施体制は、図表-6のとおりである。

成果としては、同プロジェクトにより家庭用電力並みの発電コストを達成するための効率及びコストの目標が設定され、シリコン結晶系薄膜、CIS系薄膜ともに事業化が決まった。超高効率結晶化合物系についても試験販売やサンプル出荷を通して事業化のめどが見えてきているとされていた。今後の展望として「既存電力料金に対抗し得るレベルにするためには、更なる高効率化のための研究開発により、発電コストの一層の低減を図る予定である。これにより太陽光システムの大量導入に貢献するものと考えられる」と締めくくっている⁴²⁾。

図表-6 先進太陽電池技術研究開発の実施体制



(出所) NEDO技術開発機構・新エネルギー技術開発部『先進太陽電池技術研究開発』（事業原簿）、2006年、p6.

4-2-2) 太陽光発電システム未来技術研究開発 (2006~2010年)

そして、先進太陽電池プロジェクトを引き継ぐ形で現在も進められているプロジェクトが「太陽光発電システム未来技術研究開発」である。機関は4年間で100億円が投じられている。研究対象は、「CIS系薄膜太陽電池」「薄膜シリコン太陽電池」「色素増感太陽電池」「次世代超薄型シリコン太陽電池」「有機薄膜太陽電池」「次世代技術の探索」の6項目である⁴³⁾。

CIS系薄膜太陽電池では、メリットとして、①金属・プラスチックなどの軽量基板上への電池形成が可能であることから多様化に適していること、②シリコン原料の制約がないこと、③材料のハンドギャップを広くすることで周囲温度に対する出力の依存を小さくすることができること、④結晶シリコン太陽電池に比して、日射量が多い夏季の発電量を増やし、年間発電量の増大が期待できること、が挙げられている。なかで高効率化と軽量基板上への電池形成技術が重視されている。高効率化の目標は、サブモジュール10cm角程度で変換効率18%、サブモジュール30cm角程度で16%であり、軽量基板上への形成においては、サブモジュール10cm角程度で変換効率16%とされている。先進太陽電池プロジェクトに比べて、CIS系の太陽電池に関しては、軽量基板形成がより重要視されてきている。変換効率は目標値は当然ながら一層高められている。委託を受けている企業や研究機関、大学ということでは、東京大学、昭和シェル、産総研・筑波大学・鹿児島大学、青山学院大学の4主体である。先進プロジェクトに比べ大学が増えている。昭和シェルは継続している。

薄膜シリコン太陽電池では、厚さ10 μ m以下の薄膜シリコンで形成され、材料コストの低減により材料供給の制約はないとされる。省シリコン化よりも脱シリコン化の方が重要である筆者は考えるが、同プロジェクトでは次世代の担い手の対象となっている。メリットは、①結晶シリコン太陽電池に比べて、周囲温度の上昇に伴う出力低下が低減される特性を持つこと、②日射量が多い夏季の発電量増加に有利で、年間発電量の増大が期待できること、③安全性に問題のある元素を使用しないことから環境負荷が小さいこと、である。ただし、問題点が多いように思われる。つまりは、研究開発の課題が多く、生産性向上の技術（高品質な微結晶シリコンを高スループットで生産する技術など）、高効率化技術（ワイドギャップ材料、ナローギャップ材料、セル化・モジュール化技術）などである。

委託先企業としては、三洋電機、カネカ、三菱重工、富士電機アドバンステクノロジー、産総研・名古屋大学などである。注目企業としては、あくまで筆者の個人的な判断に過ぎないが、三洋電機は、アモルファス／薄膜結晶シリコン積層型の太陽電池で蓄積があり、ロールツウロール方式の量産技術もある。省シリコン化といえども、シリコンを用いること自体が次世代としての特性に弱さがあるのではないかという感が否めないが、これまでの取り組み実績や蓄積からして注目できよう。また、非ガラス基板＝フィルム型アモルファス太陽電池への蓄積がある富士電機も三洋とほぼ同じ理由で注目できる。ただし、変換効率の達成目標が三洋が9%、富士電機が10%と低いところが気になる。この点、先進太陽電池のプロジェクトから継続しているカネカは、3接合以上の多接合薄膜シリコン太陽電池の開発を手がけており、変換効率の達成目標は16%以上が目指されている。同じく継続組みの三菱重工もカネカとよく似たアプローチであり、多接合型太陽電池で高効率化が目指され、ボトムセルの長波長吸収特性向上、ミドルセルの高電圧化、光劣化を抑制したトッ

プセルの開発が大きな課題となっている。同社も変換効率目標は15%と高めである。

色素増感太陽電池であるが、メリットとして、①シリコン材料以外の低コスト材料を用いること、②高真空プロセスなどを使用しない簡便な工程で製造が可能であること、③低価格化の可能性が大きいこと、④入射角度が大きい光でも発電特性を保つ特性があり、朝・夕の時間帯で大きな発電量が期待できること、⑤周囲温度に対する出力の依存性が小さいため、日射量が大きい夏季の発電量を増やすことが可能であること、⑥朝・夕の時間帯での発電も合わせて年間発電量の増大が期待できること、などが挙げられる。反対に課題では、モジュールについて変換効率の向上と耐久性の向上が必要とされている。研究開発の具体的内容であるが、高効率化に向けては、新規の色素開発（非ルテニウム系材料の開発など）、高性能半導体電極の改善、タンデム構造の色素増感太陽電池の開発などである。モジュール化技術の開発や耐久性ということでは、対極/電解質等の低コスト化と耐久性向上、JIS規格における $-40^{\circ}\text{C}\sim+85^{\circ}\text{C}$ の繰り返し温度サイクルにおいて1,000時間以上の性能維持、半導体電極の低音形成技術、集積構造（集積化ロスの低減）の開発、などが挙げられる。

委託先企業では、フジクラ・東京理科大学、シャープ・産総研、(財)電力中央研究所、岐阜大学・(株)ケミクレア・(株)積水樹脂技術研究所、九州工業大学・新日鐵化学(株)、大阪大学・東洋製罐(株)・関西パイプ(株)、信州大学・コア(株)・保土谷化学工業(株)、の7組である。産学の連携という形態が目立つ。注目される委託先としては、フジクラはこれまでも蓄積がある。耐久性のある色素増感太陽電池モジュールそのものを開発しようとしている。シャープも同様にモジュール自体の開発に乗り出してきている。その他、新規参入組が多い。そうした企業や大学は、典型的な色素増感太陽電池モジュールの開発というよりは、独特の要素技術で参入してきている傾向がある。例えば、岐阜大学組は、ナノ構造酸化亜鉛電析膜を用いる方式であり、九州大学組は、立体的多層構造を有するハイブリッド色素増感太陽電池の開発である。

先進太陽電池プロジェクトにおいてもそうであったが、太陽電池の種類は概ねアモルファスシリコン系、化合物系、有機系の3つであり、化合物系はCIS型、有機系は色素増感太陽電池であった。未来技術研究開発では、この3つに加えて「次世代超薄型シリコン太陽電池」「有機薄膜太陽電池」「次世代技術の探索」が加えられている。

次世代超薄型シリコン太陽電池であるが、メリットとして、①使用するシリコン基板の厚さを $100\mu\text{m}$ レベルまで超薄型化を図ること、②使用するシリコン量を低減すること、③製造コストを低減し、シリコン原料供給の制約を緩和させること、である。課題としては、製造工程で割れや反りが生じることであり、従来技術の延長線上にない革新的なプロセス技術、ハンドリング技術が必要となるところである。具体的には、多結晶シリコンのスライシングにおいて重要なインゴットの最適化、厚さ $100\mu\text{m}$ のスライス技術の選択と最適化（カーフロス $150\mu\text{m}$ 以下）、スライス後の極薄シリコン基板の量産時に適用可能なハンドリング技術・搬送技術、など研究開発課題は多い。

委託先企業は、京セラ、三菱電機・東京工業大学、産総研・トヨタエイトック、第一機電、シャープ・東北大学・日兵トヤマ・岡山大学・PVTEC、豊田工業大学・九州大学・明治大学、の6組である。京セラはシリコン系では蓄積がある。三菱電機も同じことが言える。この2社は太陽電池に関しては「古参」メーカーである。変換効率の達成目標値

も18%でかなり高い。産総研は超薄型ヘテロ構造のシリコン太陽電池を目指しており、インゴットのスライス速度 $10\mu\text{m/s}$ 、ウェハの厚さ $100\mu\text{m}$ 以下、カーフロス $100\mu\text{m}$ 以下でプラズマスライスする技術の確立も目指されている。

シャープは色素増感でも委託先企業となっており、超薄型シリコン太陽電池でも委託先企業となっている。アモルファス系の太陽電池でタンデム型、トリプル型の取り組みを行っていたが、幅広く次世代の太陽電池を手がけている。省シリコン、脱シリコンのどちらも研究開発を行い非常に積極的な企業となってきている。ただ単独では行わず、大学やその他の企業との連携で進めている。シャープは超薄型多結晶シリコンセルの高効率化を手がけ、基板表面形状・裏面反射層構造の検討、パッシベーション技術、低負荷セルプロセスの開発、超薄型セルのモジュール製造工程の課題検討、などを主に行っている。変換効率の目標値は18%である。新規に参入した豊田工業大学組みは、低コスト化を図るため、不純物が多い低コストシリコン原料を用いたロバスト多結晶シリコン製造技術の研究開発という独自性の強いテーマを追求している。不純物の偏析による多結晶インゴットの高純化、薄型基板の破損低減のための残留応力緩和を目指したインゴット結晶成長技術の開発などを手がけている。

有機薄膜太陽電池では、メリットとして、①シリコンを使用せず、高真空プロセスなどを使用しない工程で製造が可能であること、②低価格化の可能性が高いこと、③周囲温度に対する出力の依存性が小さいため、日射量が多い夏季の発電量を増やすことが可能であること、④年間発電量の増大が期待されること、などである。色素増感とよく似ているが、色素増感は独立して別分けて取り上げられているが、一部でダブリがある。課題は、セル（面積 1cm^2 以下）変換効率が5%と他の太陽電池に比べて著しく低く、大気中での性能低下が生じるなどの耐久性にも問題がある。具体的な研究開発内容としては、高効率化に向けては、p型およびn型材料探索・デバイス構造の検討、短絡電流向上のための光電変換部分（pn接合界面等）の増大、新デバイス構造、積層化技術の開発などである。耐久性向上には、大気中における性能劣化の要因を不純物、大気との化学反応の両面から検討して明確化していくことが必要とされる。

委託先企業であるが、産総研・松下電工、金沢大学・小松精練、名古屋工業大学、京都大学・新日本石油の4組みである。産総研組みは、有機薄膜自体の特性は定かでないが、高効率化ということでは、低分子系と高分子系とを並行して推進し、面積 1cm^2 のセルで変換効率5%の達成を目指す。金沢大学組みは、界面修飾や有機分子の配向制御などの要素技術を開発することで高効率化を計っている。名古屋工業大学は、ドナーアクセプタネットワーク構造を有する有機薄膜太陽電池において、誘導体の合成、ネットワーク薄膜の形成、薄膜作成法の開発を行い制御されたネットワーク構造を有する有機薄膜をデザインしようとしている。京都大学組みは、デバイス構造の開発において、短絡電流密度と開放電圧の向上を目的に、電子輸送層材料、活性層材料、ホール輸送層材料の探索を中心に高分子タンデムセル、低分子タンデムセル、超階層ナノ構造セルの開発を行っている。

最後に「次世代技術の探索」であるが、「従来の概念にとらわれない、新しい材料・構造・製造方法等により大幅な低コスト化・高性能化・長寿命化が実現可能と考えられる新しい発想の太陽光発電システムに関する研究開発」を探索するものである。委託先企業や大学は多く、11組みである。シャープ・大同特殊鋼・大同メタル工業、龍谷大学・東京工

業大学、福井大学・筑波大学・豊田工業大学、長岡工業専門学校、東京工業大学、大阪大学、岐阜大学、北陸先端科学技術大学院大学、京セラ・東京大学、ペクセル・藤森工業、東北大学、である。大学の参入が多い。従来の概念にとらわれないところから、テーマは多岐にわたり独自性も強い。

注目企業や大学ということでは、テーマが多岐にわたり、独自性が強いこともあるため絞るのは難しい。シャープ組みは先進太陽電池のプロジェクトからの継続である。

化合物半導体も用いた3接合最適構造により、1,000倍集光に適した超高効率多接合太陽電池の開発である。変換効率の達成目標は45%と突出している。竜谷大組みは、スクリーン印刷/焼結法を用いた低コストCIGS太陽電池作製プロセスを開発している。材料にはメカノケミカルプロセスで作製したCIGS光吸収材料を基にしている。福井大学組みは、窒化インジウム系材料という新規な材料に着眼しており、長岡工業専門学校も新規材料CZTSに着目しての太陽電池の可能性を探っている。東京工業大学は、革新的な光吸収層の開発に取り組み、大阪大学は高性能化の向上のためにナノ構造光封じ込め基板の開発に取り組んでいる。岐阜大学組みも高性能化を重要視し、高性能な微結晶3C-SiC薄膜ヘテロ接合形成要素技術とタンデムセル用透明中間層等の太陽電池系形成技術の開発を手がけ、北陸先端組みは、多結晶シリコン薄膜の高品質化を図るため、瞬間熱処理法（高圧水蒸気熱処理）の開発に取り組んでいる。京セラは、アモルファス/有機系タンデムという構造により、光劣化を防ぎ耐久性を向上させる太陽電池の開発を目指している。ペクセルはプラスチック色素増感太陽電池の開発であり、低温製膜法と電極材料の改良などにより、高効率化を図っている。東北大学は高品質なシリコン薄膜結晶の成長技術を、熱平衡に近いシリコン溶液からのLPE成長法を用いて開発している。

4-3. 今後の課題と展望

以上、次世代の製品化に向けた技術開発や企業の戦略動向を考察してきた。日本企業の優位性は、実用的な要素技術で優位に立っており、今後ともそうした優位性を活かしてのビジネス展開が必要である。開発側のメーカーとしては、「脱シリコン」を視野に入れた製品開発が必要とさるのではなかろうか。大学や研究機関の研究成果を活用できる。独自技術はブラックボックス化に傾斜した技術開発を行うにしても、政府のプロジェクトや研究機関の成果を活用しない手はない。そうした意味では、研究や開発環境は明るい材料である。

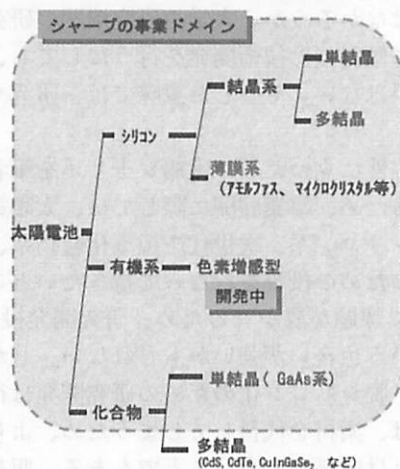
完成品メーカーによる優位性に立つための戦略シナリオを筆者なりに示せば、技術開発のターゲットは多岐にわたるため、事業展開に際しては、太陽電池に関わる事業ドメインを広げ、現状の主流であるシリコン系、次世代を担う化合物系、有機系とできれば3つのドメインを開いて研究開発のための投資を行なって行きたいところであろう。シリコン系に関しては材料調達と量産に課題が置かれるため、研究開発投資というよりは、「規模の経済」のための設備投資という色合いが強いかもしれない。しかし、次世代の対象に関しては、焦点が絞りにくい、脱シリコン化のための研究開発は行なっておくべきであると考え。脱シリコンの実現は、素材を代替してしまうため、よりイノベティブな要素が多い。変革要素が大きいことは成長が大きいことでもある。収益性よりも成長性を重視した戦略が優位性につながるように思われる。ただし、できるだけ効率的な研究開発費の使

い方をしたいものである。大学との連携や政府のプロジェクトを活用しながら研究開発費をシェアし、そうしたところで基礎研究成果を高め、社内においては実用的な要素技術を蓄積していくといった「研究開発の効率性」も大切となる。全体をうまくマネジメントしていかななくてはならない。

ちなみに、国内トップのシャープは、図表-7のように事業ドメインをシリコン系、化合物系、有機系と3つで開き事業展開している。シナジー効果を高めるには、例えば、薄膜化、非遮光基板と軽量化・フレキシブル化を共通課題として方向づけし、有効な要素技術を独自に開発していくといった発想が良いように思われる。また、全体として変換効率など性能を高める高付加価値戦略をとるか、あるいは性能を落としてもコストの低減と量産を狙うか、この選択も難しいが、新興勢力の参入を考えると、高性能化と高付加価値化に軸を置く方が優位性を保てるのではないかと推察する。

海外では、GEが05年に策定したクリーンエネルギー化への取り組み「ecomagination」の一環として、2010年までの間で毎年15億ドルの研究開発費を投じる方針を決めている。次世代市場や製品に関しては積極的な姿勢が必要とされる。またGE Energyは、薄膜太陽電池の開発・販売を行っている新興企業Prime Star Solar（本社：米国コロラド州Goldenで06年に設立）の普通株を買い増しし、多数株主になったと発表している。M&Aで一気に参入してくる戦略も有効である。この先そうした戦略は増大してくるであろう。特に新規参入組みの典型的な参入シナリオとなるであろう。この点、わが国の完成品メーカーは太陽電池の分野では蓄積がある企業が多い。連続的な技術の蓄積がある。外部から一気に調達した技術（＝資源）とは、やはり違いがある。違いはどこに大きく現れるかを考えた場合、高付加価値化を実現しやすいところであろう。この能力こそ優位性の源泉といえる。技術開発の焦点が絞られず、多様なアプローチが可能な段階では、産官学による共同研究を重視して探索しながら、徐々に共通の要素技術やプロセス技術を確立させて、さらに企業ごとに独自性を加えていくといった流れで進められていくものと思われる。

図表-7 シャープの事業ドメイン



（出所）http://www.mof.go.jp/singikai/zaisanfollow_up/siryoku/20080515/sharp.pdf

経済産業省資源エネルギー庁は、新素材、新概念を活用した革新型太陽電池を2050年に向けて実用化することを目指した技術開発を、08年より7年間の予定で開始した。中心となる研究拠点は、東京大学先端科学技術センターと産業技術総合研究所つくばセンターの二つである。東京大学先端科学技術センターでは新概念を用いた量子ドット型（理論効率60%）などを開発、産業技術総合研究所つくばセンターでは薄膜を積層した多接合型などを開発する。今後、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）を通じて、両研究拠点を中心としつつ、国内の大学や民間企業などの他の研究機関とも緊密に連携を図りながら研究開発を進めていくものである。当面は、国家プロジェクトによる先端研究（研究機関・大学と企業との共同）が先進性を引き上げることになろう。新興勢力との格差を広げるためにも、ビジネスチャンスを広げるためにも、官民上げての研究開発活動が重視される状況が続くものと予想される。

注)

- 1) 08年の地球温暖化の総合対策「福田ビジョン」は、太陽光発電の導入量を2020年に現状の10倍、30年に40倍に引き上げる目標を盛り込んでいる。日経朝刊、8月8日付け。
- 2) 前田（正）研究室「太陽電池用シリコン素材の製造プロセス」（生研リーフレットNo. 289）、東京大学生産技術研究所発行、1997年（<http://www.iis.u-tokyo.ac.jp/publications/eaflet/970602/289.html>）を参照されたい。
- 3) 『週間 東洋経済』東洋経済新報社、2008年8/16・23合併特大号 p 96。
- 4) 榊原清則著『イノベーションの収益化』有斐閣2005年ならびに榊原清則・香山 晋編著『イノベーションと競争優位』NTT出版、2006年など参照されたい。
- 5) アジアでは韓国もそうした制度を導入している。CNET 2008年.3.11. <http://japan.cnet.com> ニュースより。
- 6) 清水 誠「太陽電池産業に押し寄せる3つの変化—スピード経営で台頭するインドや中国の新興勢力—」『今月のトピックス』日本政策投資銀行、No121, 2008年、p 1。
- 7) 断りのない限り。フリー百科事典『ウィキペディア（Wikipedia）』の「太陽電池」による解説内容を参照している。
- 8) 太陽電池の種類に関しては、その形式や性能は非常に多様であり、近年は複数の型を複合させたものも実用化されているため、ここに挙げた分類法も絶対のものではない。
- 9) 前田（正）研究室、前掲（<http://www.iis.u-tokyo.ac.jp/publications/eaflet/970602/289.html>）。
- 10) フリー百科事典、前掲。
- 11) 同上。
- 12) 同上。
- 13) 同上。
- 14) 山家公雄／植村佳代「太陽光発電をめぐる最近の動向—激しさを増す国際競争と開発が進む薄膜系—」『今月のトピックス』日本政策投資銀行、No121、2008年、p 2。
- 15) 業界ニュース（<http://www.media-ir.com/press/taiyoudenn/>）など参照。
- 16) 『週間 東洋経済』（8・16・23合併特大号）、東洋経済新報社、2008、p95。
- 17) 三菱電機ニュースリリースNo.0817 <http://www.mitsubishielectric.co.jp/news-dat>

- a/2008/pdf/0319-b.pdfより。
- 18) ただし、必要なシリコン材料すべてを自前でまかなうというわけではない。商社を通しての外部調達ルートもある。商社は太陽電池に関して、川上から川下までさまざまなプロセスに介入しているが、動きが早く活発であるのが住友商事といえる。詳しくは『週刊 東洋経済』、前掲、p103を参照されたい。
 - 19) 産業タイムズ社『太陽電池産業総覧』産業タイムズ社、2007年、pp111から122参照。
 - 20) 丸川知雄「太陽電池産業の現状と尚徳電力（サンテック）の日本進出」『平成19年度 中国企業 のグローバル化報告書』（編著）財団法人国際貿易投資研究所、2008年、pp24～25。
 - 21) 同上、p25。
 - 22) NEDO技術開発機構・新エネルギー技術開発部『先進太陽電池技術研究開発』（事業原簿）、2006年、p4。
 - 23) 特許庁総務部技術調査課 技術動向班『平成17年度 特許出願技術動向調査報告書 色素増感型太陽電池（要約版）』2006年、pp1～2。
 - 24) 同上、p3。
 - 25) 同上、p41。
 - 26) 三菱は参入してまだ間もないように思われるが、2000年12月にアモルファスシリコン太陽電池事業に参入している。三菱重工ニュース、三菱重工技報 Vol.41 No.1. 2004年など参照されたい。
 - 27) 富士電機グループニュース (<http://www.fujielectric.co.jp/news/06112401/index.html>) より。
 - 28) 伊原卓郎・宗像智郎「フィルム基板型アモルファスシリコン系太陽電池の量産技術」(RESULT&REPORT (成果報告3))『Focus NEDO』、Vo4、No16、p14。なお、断りのない限り同報告書に負っている。
 - 29) 富士電機システムズHP (<http://www.fesys.co.jp/sougou/seihin/fwave/qa.html>) より。
 - 30) 篠原・島・平・松本・内橋「アモルファス／薄膜結晶シリコン積層型太陽電池」『SANYO TECHNICAL REVIEW』Vol36、No2 (DEC)、2004年、p34。
 - 31) 同上論文、pp40～41。
 - 32) 詳しくはNEDO技術開発機構・新エネルギー技術開発部、『先進太陽電池技術研究開発』（資料6－3（2）CIS系薄膜太陽電池モジュール製造技術開発 ①CIS薄膜高品質化技術－説明資料－ 昭和シェル石油㈱）2006年、p3。
 - 33) 日経ネット<http://www.nikkei.co.jp/kyushu/silicon/sil070904.html>より。
 - 34) 近藤道雄「PVSEC速報」（国際会議速報H19－No17－ 第7分野：太陽光エネルギー）財団法人 光産業技術振興協会、2007年、p5。
 - 35) ホンダHP (<http://www.honda.co.jp/soltec/module/index.html>) より。
 - 36) 特許庁総務部技術調査課、前掲報告書、p42。
 - 37) 江連・田辺・北村・松井・岡田「900×1,200mm² 色素増感太陽電池モジュール」『フジクラ技法』第110号、2006年、p41。
 - 38) 同上。

- 39) テクノフィーチャー：メカトロニクス 大学発ベンチャーシリーズ 第10回 「光合成の原理を利用した色素増感太陽電池で業界に旋風－ペクセル・テクノロジーズ株式会社－」 (<http://www.gicho.net/dai010>) より。
- 40) NEDO『先進太陽電池技術研究開発(事業原簿)』2006年ならびNEDO「(新エネルギー技術開発プログラム)『新エネルギー技術研究開発』基本計画(PO7015)」『太陽光発電システム未来技術研究開発』2007年 (http://www.nedo.go.jp/activities/portal/p07015_2.html) に負っている。
- 41) NEDO『先進太陽電池技術研究開発(事業原簿)』、前掲報告書、p6.
- 42) 同上報告書、p30.
- 43) NEDO『太陽光発電システム未来技術研究開発』、前掲報告書 (http://www.nedo.go.jp/activities/portal/p07015_2.html) より。以下、この資料に負っている。